

大規模数値計算を使う 統合地震シミュレーションの高度化

ソバニネジャド ゴラムレザ¹・壁谷澤一寿²・堀宗朗³

¹東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生) E-mail: sobhani@eri.u-tokyo.ac.jp

²東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生) E-mail: tosikazu@eri.u-tokyo.ac.jp

³東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生) E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

統合地震シミュレーションは、地震発生・構造物応答・災害対応の3つの過程をシームレスに計算するシステムである。都市域を対象とするため計算は大規模となるが、特に構造物一棟一棟を対象とするモデル構築と地震応答解析には効率的過程にはハイパフォーマンスコンピューティングが必要となる。本研究は地理情報システムを利用したモデル構築と非線形地震応答解析を対象に、並列計算を利用した大規模数値計算が可能となるよう統合地震シミュレーションのシステムの高度化を行った。ノード間のデータの受け渡しを工夫することで、効率的な並列計算を可能とし、約 10,000 棟の構造物を対象とした並列計算に成功した。

Key Words : *high performance computing, software integration, software engineering, object oriented design*

1. はじめに

著者のグループは統合地震シミュレーション (Integrated Earthquake Simulation, IES)^{1),2)}を開発している。これは、都市域を対象に、地震発生・構造物応答・災害対応の3つの過程をシームレスに計算するもので、シミュレーションベースの次世代ハザードマップの作成を目指している。IES の対象となる都市モデルは地理情報システムから自動構築される。IES で使われる数値解析手法は、地震学・地震工学や災害対応に関して蓄積された多種多様な数値解析手法である。IES は、構築された都市モデルに対し、数値解析手法を統合したシミュレーションを実行するのである。

都市域を対象とするため IES の計算は大規模となる。時空間の分解能を上げるためにはハイパフォーマンスコンピューティングが必要となるが、特に構造物一棟一棟のモデル構築と応答解析を行う構造物応答のシミュレーションには重要となる。この点を考慮し、本研究は、IES のシステムにレイヤ構造を導入し、分散クラス (Generic Distributable Class, GDC) と MPI を使った並列計算^{3),4),5)}の実装を行った。レイヤ構造にデータレイヤとシミュレーションレイヤを置き、データ構築と応答解析を分離するとともに、並列計算手順の見通しを明瞭にする。抽象的なレイヤ間のデータ転送と実際の計算ノード間のデータの受け渡しには GDC とそれを使った MPI を利用する。

本論文は、第2章と第3章でレイヤ構造と並列計算の実装を説明する。IES は C++ を使ってコード化され

ている、システムに導入された具体的なクラスを説明する。第4章において高度化された IES の数値実験を行う。これは東京 23 区を対象としたもので、約 10,000 の建築建物を対象とした並列計算を検討する。線形と非線形の2つの解析手法が使われている。

2. レイヤ構造の導入

従来¹⁾、IES のシステムはラッパーに基づくものであった(図-1 参照)。ラッパーは、各構造物に作成され、データ構築・数値解析実行・結果出力に関わる一連の過程を担当する。データのソースや数値解析に使われる手法が異なっても、ラッパーを介すことで統一的にシミュレーションを行うことが可能である。一方、データのソースや数値解析や結果出力の手法の数が増えるとラッパーは複雑になる。例えば、ソース、数値解析手法、結果出力手法の数を N , M , L とすると、最大 $N \times M \times L$ の組み合わせにラッパーは対応しなければならない。

ラッパー構造の限界を克服するため、IES にレイヤ構造を導入する。これは、データ構築・数値解析実行・結果出力の過程を独立のレイヤとするものである(図-2 参照)。レイヤの間ではデータが転送されるが、転送されるデータの形式を共通とすると、データ転送は簡単に実行できる。IES ではレイヤ間を転送されるデータを共通モデルデータ (Common Modeling Data, CMD) と称する。前述の例に倣えば、では、レイヤ内のデー

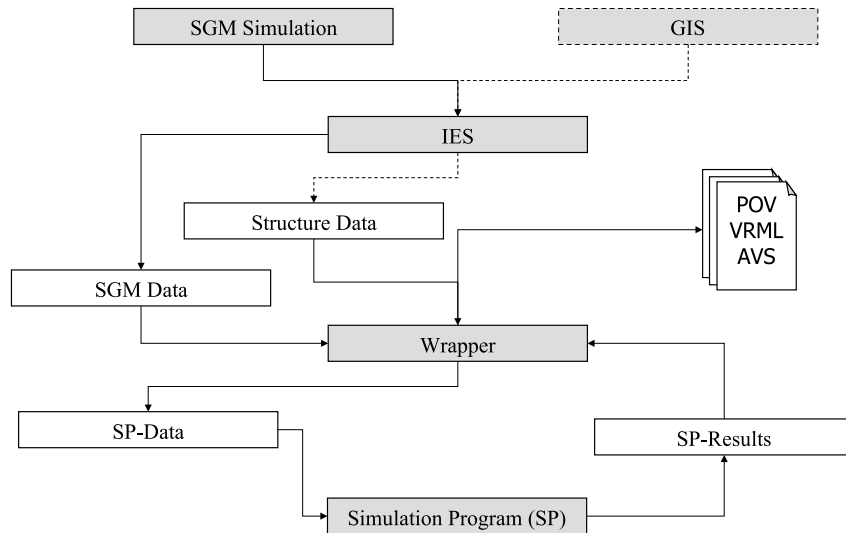


図-1 ラッパー構造の IES.

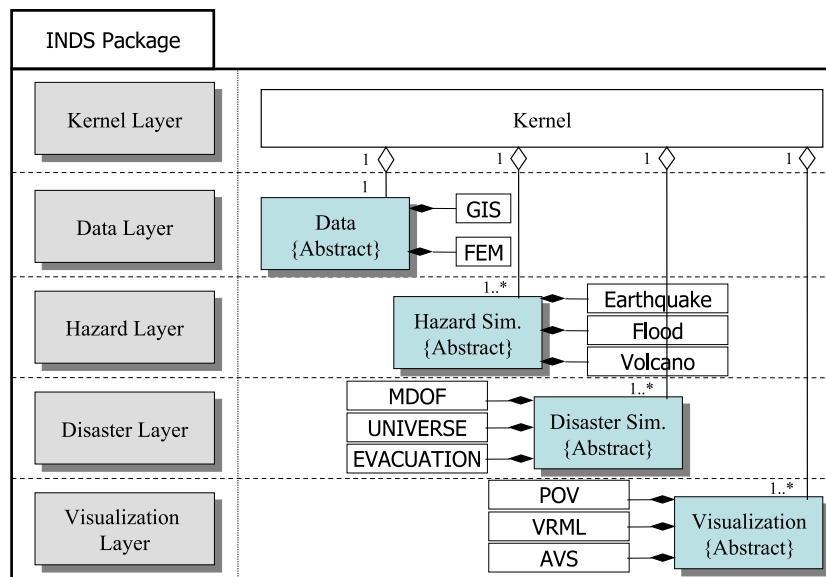


図-2 レイヤ構造の IES.

タを CMD に変換する数は $N + M + L$ ですむ。

IES にレイヤ構造を導入する際、鍵となる技術は CMD の作成である。構造物応答の数値解析手法には有限要素法が使われるため、CMD の実体として、有限要素法の入力データと同じ構造の shape クラスを作成する (図-3 参照)。shape の形状データは node と element という 2 つのクラスとなる。なお、データソースである地理情報システムはポリゴンを使う。ポリゴンを node

と element に変換することがモデル構築の主要な作業の一つとなる。応答計算の結果である節点変位や要素歪は node と element に付属させる。この作業を簡単にするため、shape の派生クラスとして data を作成する。

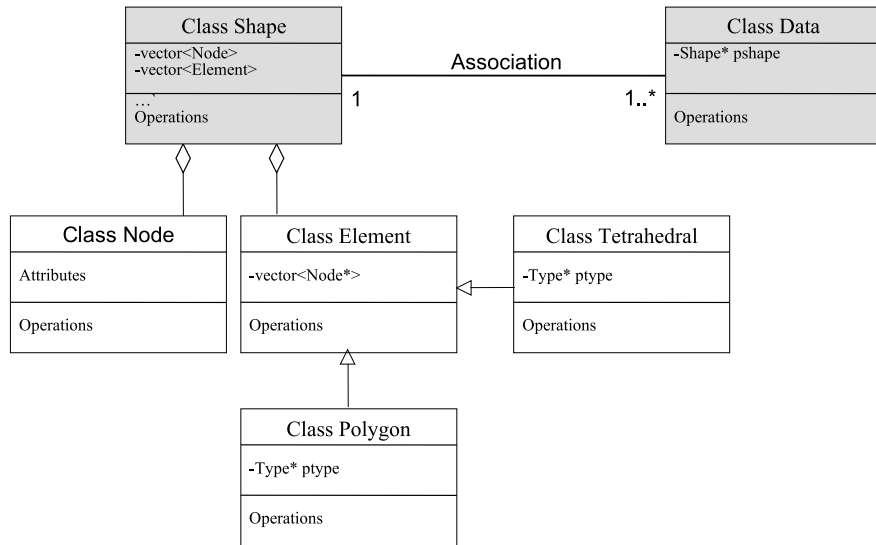


図-3 shape クラスの概要.

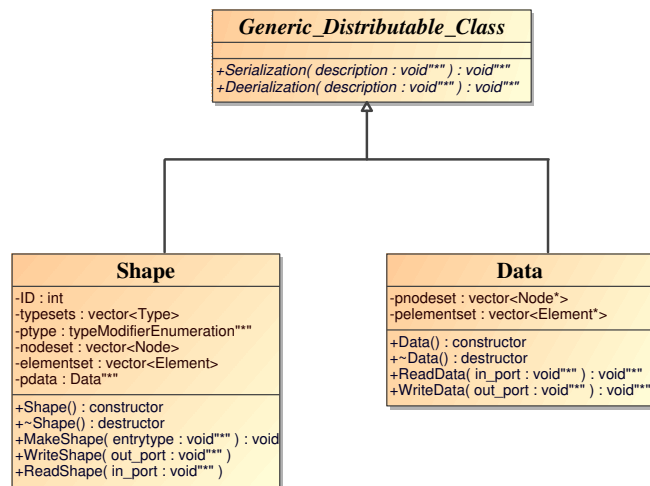


図-4 GDC の設計と利用.

3. 並列計算の実装

GDC は Serialization and De-serialization という 2 つの機能を持つクラスである (図-5 参照). Serialization はノード間通信に支障なく使えるよう各種データを一 つにまとめて変換することであり, De-serialization は まとまったデータをばらして元の形式のデータに変換 することである. 対象となるデータの規模が小さく構 造が簡単な場合, Serialization and De-serialization は 単純である. しかし, 有限要素法の大規模な解析モデ ルのように, 量が大きく構造が複雑なデータでは, 高 い堅牢性が必要となる. また, IES ではさまざまなデー

タソースや解析手法の利用を想定しているため, 拡張 性の高さも必要である. このため GDC は抽象化され ている.

IES に MPI を使った並列計算を実装するには, MPI ライブラリの利用の可否が鍵を握る. MPI ライブラリの利用の汎用性を高めるため, 新たに MPI_Process_Manager クラスを作成する (図-5 参照). このクラスは, 計算ノードの初期化とノード間の通信 を担当する. IESではノード間で実際に伝達されるデー タは GDC であるため, これを扱う特殊なメンバ関数 も作られている.

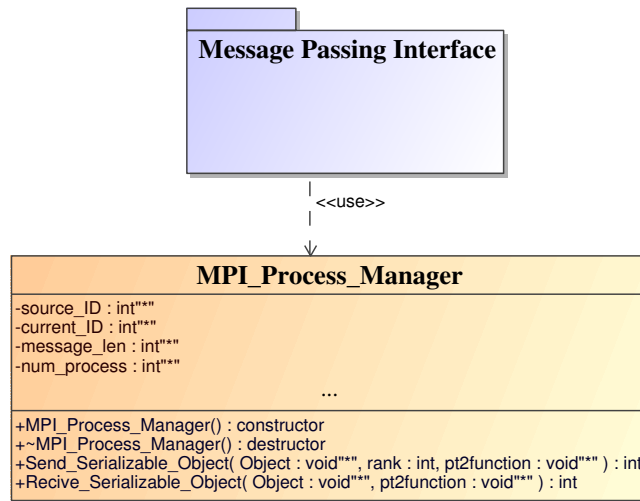


図-5 MPI_Process_Manager クラスの概要.

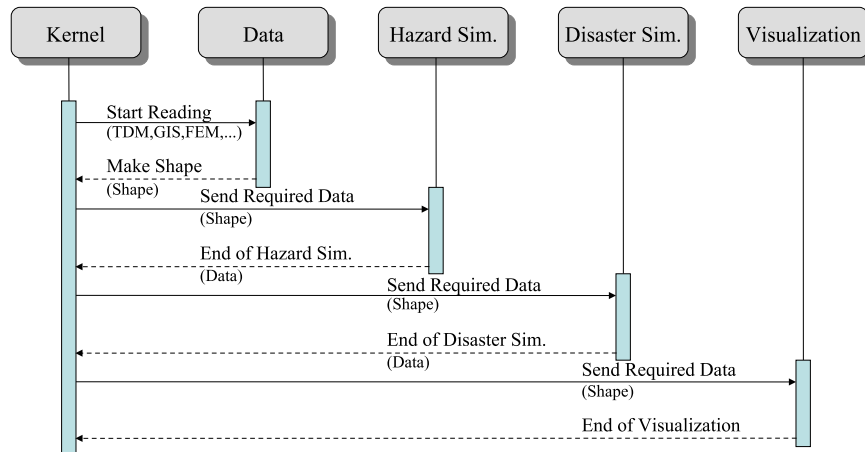


図-6 並列計算の計算過程.

図-6 に IES で行われる並列計算の過程を示す。この図には計算の階層も示している。IES の制御は kernel クラスが担当し、これが、CMD を介したレイヤ間のデータ転送ないしノード間通信を管理する。なお、IES の並列計算機のアーキテクチャはクライアント-サーバ型を想定している。またロードバランス戦略は最も簡単な first-come-first-served である。

4. 数値実験

本章では、1つの地理情報システムを使ったモデル構築と、線形と非線形の2つの数値解析手法を使った構造物応答のシミュレーションを行う。対象となる構造物

は約 10,000 棟の建築建物であり、線形と非線形の多自由度系モデルを自動構築する (図-7 参照)。並列計算機を使った比較的大規模な数値計算が必要であるが、改良された IES は、支障なく地震応答のシミュレーションを行うことに成功した。

線形多自由度系モデルの自動構築は既に報告済みである。建物の階数と自由度を一致させ、経験式を使って固有周期・モードや減衰を決定する。これに比べて、非線形多自由度系モデルの自動構築は遥かに難しい。建築建物の場合、構造形式や年代に応じて、質点を結ぶパネの非線形モデルが異なり、設定すべきパラメータも複数である。建物高さや面積から標準的と思われる形式を設定し、パラメータもそれに見合った値とする

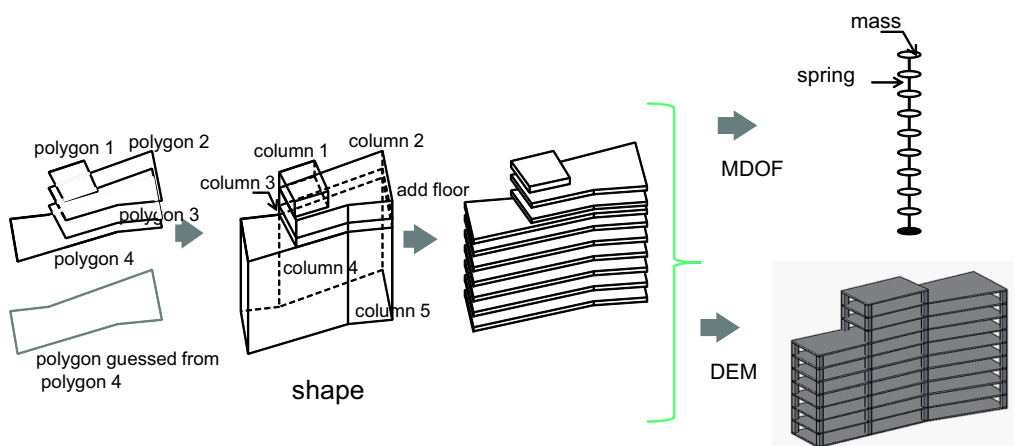


図-7 地理情報システムを使った多質点系モデルの自動構築。

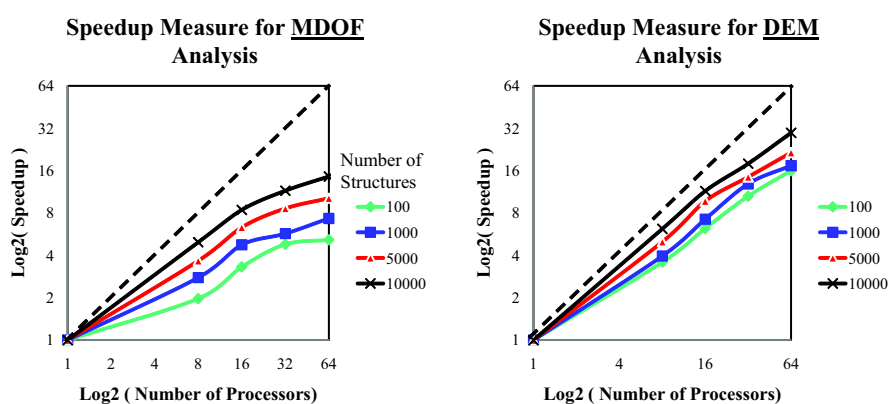


図-8 速度増加.

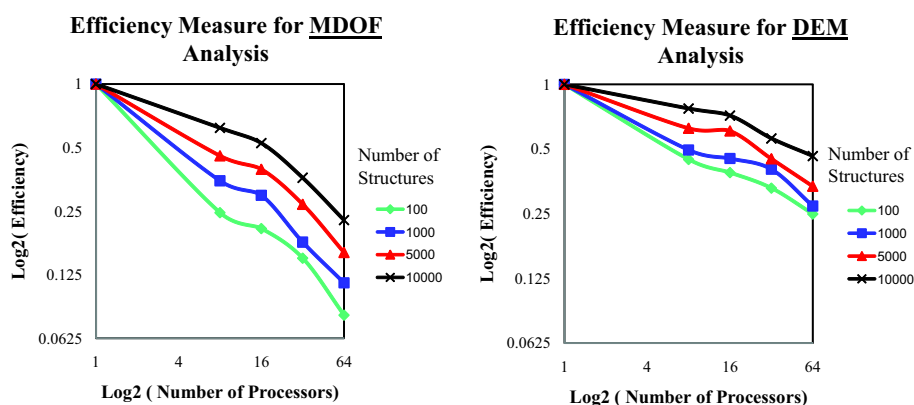


図-9 効率性.

ことでモデル構築を試みる。このモデルを標準モデルと称するが、これはあくまでも形状を基に推定されたモデルであり、モデル構築の妥当性は全く確認されていない。

並列計算の性能の指標として、速度増加 (speedup) ・

効率性 (efficiency) ・ 等効率関数 (iso-efficiency function) が使われる⁶⁾。この指標を、100~10,000 の構造物と、8~64 の計算ノードを使って求めた。使用した並列計算機は、AMD Opteron2356 QuadCore processors (2.3GHz, 4GB メモリ) である。

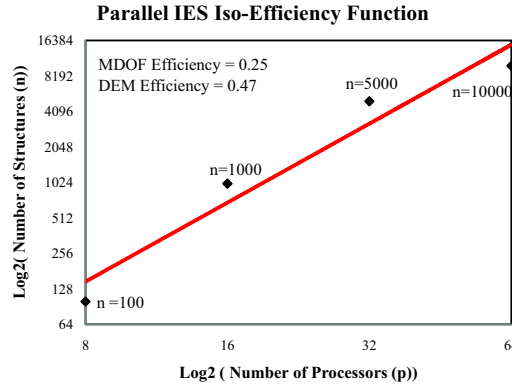


図-10 Iso-efficiency function for IES.

速度増加は、 p 個の計算ノードを使った時の計算時間を $T(p)$ とすると、

$$S(p) = \frac{T(1)}{T(p)}. \quad (1)$$

として定義される。図-8 に $S(p)$ を示す。線形・非線形の両方で、 $S(p)$ は p が p に反比例して減少する傾向がみられる。効率性は速度増加 $S(p)$ を使って次のように定義される。

$$E(p) = \frac{S(p)}{p}. \quad (2)$$

結果を図-9 に示す。線形解析の場合、非線形解析に比べて効率性が低いことがわかる。

並列計算の効率性は問題のサイズに依存する。IES では構造物の数 n が問題のサイズである。ほぼ同じ効率性で解けるサイズの問題を示す指標が等効率性関数である。計算ノードの数とほぼ同一の効率性が得られた n を図-10 にプロットする。対数軸でほぼ直線が得られており、これが等効率性関数である。線形・非線形の両方で直線の等効率性関数を得られたことから、並列計算の効率の予測が可能であり、この意味で IES はスケラブルであることが示された。

5. おわりに

レイヤ構造と並列計算を実装することで、IES のシステムを全面的に改良した。約 10,000 の建築建物を対象とした非線形構造応答の並列計算が可能であることを示した。並列計算の効率性を検証したところ、効率は安定しており、計算環境が許せばさらに大規模な数値計算が可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) M. Hori, "Introduction to Computational Earthquake Engineering", Imperial College Press, 2006.
- 2) S. Nallathamby, M. Hori, Y. Ariga, "Improvement of IES Wrapper for Plug-in of Advanced Simulation Programs", Journal of Applied Mechanics, 10, 573-579, 2007.
- 3) W. Gropp, E. Lusk, A. Skjellum, "Using MPI, portable parallel programming with message-passing interface", The MIT Press, 1999.
- 4) B. C. McCandless, J. M. Squyres, A. Lumsdaine, "Object Oriented MPI (OOMPI), a class library for the Message Passing Interface", MPI Developer's Conference, Proceedings, 87-94, 1996.
- 5) A. Grama, G. Karypis, V. Kumar, A. Gupta, "Introduction to Parallel Computing, 2/E", Addison-Wesley, 2003.
- 6) P. S. Pacheco, "Parallel programming with MPI", Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1996

ENHANCEMENT OF INTEGRATED EARTHQUAKE SIMULATION WITH MASSIVE NUMERICAL COMPUTATION

GSOBHANINEJAD Gholamreza, Kotokazu KABEYAZAWA and Muneo HORI

Integrated earthquake simulation (IES) is a system that seamless computes all processes of earthquake hazard and disaster. Computation required is massive since it is aimed at analyzing an urban area, and IES needs high performance computing in constructing an analysis model and carrying out seismic response analysis for each structure in the area. Focusing the model construction that uses geographical information system and non-linear seismic structure analysis, this paper presents the enhancement of IES by means of parallel computation. With suitable coding for data transfer between computation nodes, IES is able to be executed in parallel computation environment so that analysis of 10,000 buildings is successfully made.